

基于根系特征分析海岛棉幼苗耐碱性

杨涛,李昊宸,赵康,王红刚,程璐瑶,高文伟

(新疆农业大学农学院/棉花教育部工程研究中心,新疆乌鲁木齐830052)

摘要:针对海岛棉幼苗期进行耐碱性研究,设置不同 Na_2CO_3 胁迫浓度(0.00%、0.07%、0.09%和0.11%),待幼苗长至第11天根据其根部特征筛选海岛棉耐 Na_2CO_3 的最适浓度,并基于最适浓度评价海岛棉的耐受性。结果表明,0.09%的 Na_2CO_3 胁迫最适于鉴定海岛棉耐碱性;在0.09%的 Na_2CO_3 胁迫下,海岛棉品种根系特征性状均受到不同程度抑制,像素面积变异最弱。主成分分析将根部特征性状分为3个主成分,第1主成分为根系生物量和形态因子;第2主成分为侧根因子;第3主成分为主根长度因子。隶属函数值和 D 值之间拟合性较好,呈显著相关,因此可将两者统一进行综合评价,将海岛棉划分为敏感型、弱耐碱型、耐碱型和强抗型4类,并筛选到敏感材料4401和S(L),强抗材料JZ-1;供试海岛棉材料主要以中间型为主,极端材料较少。

关键词:海岛棉; Na_2CO_3 胁迫; 幼苗; 根系特征; 耐碱性

中图分类号:S562;S32 **文献标志码:**A

Analysis of alkali tolerance of Sea-island cotton seedlings based on root characteristics

YANG Tao, LI Haochen, ZHAO Kang, WANG Honggang, CHENG Luyao, GAO Wenwei

(College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Engineering Research Centre of Cotton,
Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In this study, the alkali resistance of Sea-island cotton was studied at the seedling stage of Sea-island cotton. Different Na_2CO_3 stress gradients of 0.00%, 0.07%, 0.09% and 0.11% were set. The optimal gradient of Na_2CO_3 was used to evaluate the tolerance of Sea-island cotton. The results showed that 0.09% Na_2CO_3 stress was the most suitable for identifying alkali resistance of Sea-island cotton. Under 0.09% Na_2CO_3 alkali stress, the root characteristics of Sea-island cotton varieties were inhibited to varying degrees, and the pixel area variation was weak. The traits were divided into 3 components; the first principal component was root biomass and morphological factor; the second principal component was lateral root factor; the third principal component was principal root length factor. The fitting between the membership function value and the D value was good and significant. Therefore, a comprehensive evaluation of the two could be carried out. The alkali resistance of Sea-island cotton was divided into four categories: sensitive, weak alkali resistance, alkali resistance, and strong resistance. The sensitive materials 4401 and S(L) and strong resistance materials JZ-1 were selected. Sea-island cotton materials were mainly intermediate and less extreme materials.

Keywords: Sea-island cotton; Na_2CO_3 stress; seedling; root characteristics; alkali tolerance

土壤盐碱化是一种土壤退化过程,导致土壤中可溶性盐的过度积累^[1],是影响作物产量和生长的非生物胁迫因素之一,影响着全球约8亿 hm^2 耕地^[2]。土壤盐碱化造成农业用地面积每年减少1%

和2%,对于干旱半干旱国家和地区尤为明显^[3-4],造成全球100多个国家和地区作物生产力降低^[5-7]。

新疆作为我国典型的干旱半干旱地区,是我国海岛棉的唯一产区,大部分为盐碱地,严重制约了

海岛棉产业体系的可持续发展。盐碱化对海岛棉生长发育产生一系列影响,例如,萌发、幼苗生长、根系发育和产量品质^[8-10]。在某些方面,以 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 为主的碱性盐危害远远严重于以中性盐 NaCl 和 Na_2SO_4 引起的危害^[11],与中性盐相比碱性盐更容易通过高 pH 值对根系施加不利影响、降低养分溶解度、增加有机酸失衡、影响无机离子的分布和积累,特别是破坏细胞的 pH 值稳态^[12]。

作物根系是最早也是植物最直接感受碱胁迫信号的部位,在逆境下的分布特征和表现是植物有效吸收和利用土壤养分最直接的适应特征^[13]。植物根系系统存在着复杂的分支结构,而不同茎级根系形态对养分积累与水分运移有不同的作用^[14-16],更强有力主根和侧根的形成可以提高作物本身的耐受性、盐分和水分的运移^[17-18],而根尖数的多少直接体现了根系的生长趋势;因此,根的生长发育状况和活力对植物耐受能力的影响至关重要。目前,国内外对植物碱胁迫做了大量的研究,例如碱胁迫下植物生物量^[9,19-20]、根系形态^[21-22]和生理特征^[22,23-24]等方面,并建立了一系列的鉴定指标和评价方法。然而,针对海岛棉多集中于 NaCl 等中性盐的研究^[25-26],针对基于根部特征研究海岛棉在 Na_2CO_3 碱胁迫浓度筛选及评价方面的研究比较缺乏。因此,本研究利用资源库随机挑选的 30 份海岛棉材料,幼苗期利用不同浓度 Na_2CO_3 进行碱胁迫,探讨海岛棉幼苗根系在不同 Na_2CO_3 胁迫浓度下的特征特性并进行耐碱材料的筛选,为进一步探究海岛棉 Na_2CO_3 胁迫生理机制和盐碱地的可持续利用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

由新疆农业大学农学院/棉花教育部工程研究中心收集的海岛棉资源材料,随机选取 30 份材料进行研究,来源类型较丰富。具体来源及名称如下:埃及 5 份,分别为 A101、JZ30、JZ-1、A102 和 JZ57;美国 1 份,为 BM-1;前苏联 11 份,分别为 270、SK202、K388、C-6022、1430、7045、80402、5904Y、2525、4401 和 8813Y;中国 9 份[新疆 3 份和其他省(区)6 份],分别为 BZ-3021、XH-2、BZ-3761、DJ-07-136、ZC-1、S(L)、T82-6-17、73-14 和 H92-1;未知来源 4 份,分别为 PI、A106、5931 和 90199。

1.2 试验方法

试验于 2021 年 4—6 月在新疆农业大学农学院棉花培养室进行。 Na_2CO_3 碱胁迫处理梯度分别为

0.00%、0.07%、0.09% 和 0.11% (Na_2CO_3 质量占干石英砂的质量比)。选取饱满、大小一致的种子若干,用 0.1% 的 HgCl_2 浸泡 10 min 消毒,用蒸馏水冲洗 5 次后催芽 24 h 备用。使用规格为 13 cm×19 cm×12 cm 的发芽盒,每个发芽盒装 700 g 干石英砂,加对应浓度的碱水 120 mL,对照 (CK) 加 120 mL 蒸馏水,选择露白一致的种子播于发芽盒中,每盒播 24 粒种子,重复 3 次。置于光照培养室内,白天温度 (25 ± 2) °C, 12 h; 夜间温度 (22 ± 2) °C, 12 h, 相对湿度为 70%~75%, 盖好盖子防止水分蒸发。播种后第 11 天测定棉苗的根系形态,每个重复取 6 株长势均匀一致的幼苗,采用 Scan Wizard EZ 扫描仪 (MRS-3200A3L, 中晶科技有限公司, 上海) 扫描根系, 万深 LA-S 根系分析系统 (万深科技有限公司, 杭州) 分析根长、投影面积、像素面积、表面积、体积、连接数、节点数、根尖数和分叉数等形态学参数,之后称量根系生物量。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Office 2010 整理数据, Origin 2020 进行数据处理分析。使用以下公式计算各特征性状的耐碱系数 STI ^[27]:

$$STI = Y_{\text{无-碱胁迫}} \times Y_{\text{碱胁迫}} / (\bar{Y}_{\text{无-碱胁迫}})^2 \quad (1)$$

隶属函数 (U) 计算公式为^[28-29]:

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, X_i 是主成分因子的值 (观测值), X_{\max} 和 X_{\min} 分别代表主成分因子 (观测值) 的最大值和最小值。

权重计算公式为^[28-29]:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中, W_i 代表权重; C_i 代表经主成分分析所得各材料第 i 个综合指标的贡献率。

综合评价价值 (D) 计算公式如下^[28-29]:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W_i] \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 不同梯度碱胁迫对海岛棉幼苗根系生长的影响

随着 Na_2CO_3 含量的提升, 海岛棉根系各性状均值呈下降趋势, 但下降程度不一致, 在 0.11% Na_2CO_3 胁迫下海岛棉幼苗均死亡或未发芽 (表 1)。根鲜质量、投影面积、表面积、体积、节点数、根尖数和分叉数在不同 Na_2CO_3 处理浓度间均呈显著差

异;根长和像素面积之间表现为CK与0.07%和0.09%的Na₂CO₃胁迫间呈显著差异,0.07%和0.09%Na₂CO₃胁迫处理间无显著差异;连接数在0.09%Na₂CO₃胁迫与0.07%Na₂CO₃胁迫和CK之间呈显著差异,CK和0.07%Na₂CO₃胁迫间无显著差异。基于此,选择0.09%的Na₂CO₃作为评价海岛棉幼苗期耐碱的最适碱含量进行后续分析。

2.2 0.09% Na₂CO₃胁迫下海岛棉幼苗期各根系性状耐碱系数的描述性统计

0.09%Na₂CO₃胁迫下,海岛棉各根系性状耐碱系数均值为0.70~0.86,各性状耐碱系数最大值<1,表现为在0.09%的Na₂CO₃胁迫下海岛棉各性状均受到抑制,根尖数和分叉数抑制较明显,根鲜质量、投影面积、像素面积和表面积抑制较弱;变异系数介于9.15~19.12,其中像素面积的变异系数最小,表明群体像素面积变异较弱;连接数、节点数和分叉数的变异系数较大,表明群体连接数、节点数和分叉数变异较丰富(表2)。

2.3 0.09% Na₂CO₃胁迫下海岛棉幼苗期各根系特征性状耐碱系数的相关性分析

海岛棉耐碱性是受多基因控制的复杂数量性状,各性状之间存在紧密连锁,因此进行相关分析是必要的。相关关系表明(表3)投影面积与像素面积、表面积和体积呈极显著正相关($P<0.01$),与连

接数和根鲜质量显著正相关($P<0.05$);像素面积与投影面积和表面积呈极显著正相关($P<0.01$),与体积、连接数和根鲜质量呈显著正相关($P<0.05$);表面积与投影面积、像素面积、体积和连接数呈极显著正相关($P<0.01$),与根鲜质量呈显著正相关($P<0.05$);体积与投影面积和表面积呈极显著正相关($P<0.01$),与像素面积和节点数呈显著正相关($P<0.05$);连接数与节点数、表面积、根尖数和分叉数呈极显著正相关($P<0.01$),与投影面积、像素面积和根鲜质量呈显著相关($P<0.05$);节点数与连接数和分叉数呈极显著正相关($P<0.01$),与体积和根尖数呈显著正相关($P<0.05$);根尖数与连接数呈极显著正相关($P<0.01$),与节点数呈显著正相关($P<0.05$);分叉数与连接数和节点数呈极显著正相关($P<0.01$),与根鲜质量呈显著正相关($P<0.05$);根鲜质量与投影面积、像素面积、表面积、连接数和分叉数呈显著正相关($P<0.05$)。

2.4 0.09% Na₂CO₃胁迫下海岛棉幼苗期各根系特征性状主成分分析

耐碱性是由多基因控制的数量性状,用单一指标无法明确海岛棉的耐碱性,因此有必要用主成分分析进行降维处理。KMO和巴特利特球形度检验表明KMO=0.65>0.5, sig.<0.01符合主成分分析条件,根据特征根>1的原则主成分分析将海岛棉幼苗

表1 不同梯度Na₂CO₃对海岛棉根系生长的影响

Table 1 Effects of Na₂CO₃ under different gradients on root growth of Sea-island cotton

Na ₂ CO ₃ 浓度/% Na ₂ CO ₃ concentration	根长 Root Length /cm	根鲜质量 Root fresh mass/g	投影面积 Projection area/cm ²	像素面积 Pixel area/cm ²	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume /cm ³	连接数 Number of connection	节点数 Number of node	根尖数 Root tips number	分叉数 number of forks
0.00	16.99a	0.20a	3.28a	2.85a	10.30a	0.26a	215.81a	174.12a	52.95a	110.97a
0.07	14.64b	0.19b	2.92b	2.56b	9.32b	0.22b	214.81a	151.07b	46.04b	95.42b
0.09	14.07b	0.17c	2.74c	2.42b	8.70c	0.20c	162.40b	132.08c	36.81c	81.38c
0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注:“-”表示幼苗在0.11%Na₂CO₃胁迫下种子未萌发或植株死亡。同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note:“-” means that the seed does not germinate or the plant dies at 0.11%Na₂CO₃ treatment. Different letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

表2 0.09% Na₂CO₃胁迫下海岛棉根系各性状耐碱系数描述

Table 2 Description of alkali-resistance coefficient of root traits of Sea-island cotton under 0.09% Na₂CO₃ stress

特征性状 Characteristic traits	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV/%
根长 Root length	0.70~0.99	0.83	10.05
根鲜质量 Root fresh mass	0.61~0.99	0.86	10.12
投影面积 Projection area	0.65~1.00	0.84	10.99
像素面积 Pixel area	0.67~0.98	0.85	9.15
表面积 Surface area	0.65~1.00	0.85	11.73
体积 Volume	0.56~0.99	0.80	14.94
连接数 Number of connection	0.51~1.00	0.76	17.26
节点数 Number of node	0.51~0.99	0.76	17.53
根尖数 Root tips number	0.51~0.89	0.70	14.85
分叉数 Number of forks	0.51~0.98	0.73	19.12

期根系指标分为3个综合指标。第1主成分特征根为4.13,贡献率为41.29%;第2主成分特征根为1.84,贡献率为18.44%;第3主成分特征根为1.13,贡献率为11.30%(表4)。

第1主成分载荷较大的为投影面积、像素面积、表面积、体积、连接数、节点数和根鲜质量,代表根形态和生物量,为根系生物量和形态因子;第2主成分载荷较大的为根尖数,代表侧根数,为侧根因子;第3主成分载荷较大的为根长,代表主根长度,为根系主根长度因子。

表 3 各特征性状耐碱系数相关性

Table 3 Correlation of alkali-resistance coefficient for each characteristic trait

性状 Trait	根长 Root Length	根鲜质量 Root fresh mass	投影面积 Projection area	像素面积 Pixel area	表面积 Surface area	体积 Volume	连接数 Number of connection	节点数 Number of node	根尖数 Root tips number	分叉数 Number of forks
根长 Root length	1.00									
根鲜质量 Root fresh mass	-0.01	1.00								
投影面积 Projection area	-0.04	0.43 *	1.00							
像素面积 Pixel area	-0.04	0.42 *	0.70 **	1.00						
表面积 Surface area	-0.03	0.46 *	0.88 **	0.66 **	1.00					
体积 Volume	0.17	0.15	0.60 **	0.43 *	0.60 **	1.00				
连接数 Number of connection	0.03	0.38 *	0.42 *	0.36 *	0.51 **	0.19	1.00			
节点数 Number of node	0.17	0.16	0.34	0.34	0.32	0.36 *	0.79 **	1.00		
根尖数 Root tips number	0.28	0.08	0.03	0.10	0.13	-0.01	0.53 **	0.45 *	1.00	
分叉数 Number of forks	0.15	0.36 *	0.31	0.12	0.27	0.08	0.56 **	0.58 **	0.20	1.00

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 4 前 3 个主成分的特征值及特征向量

Table 4 Eigenvalues and eigenvectors of the first 3 principal components

特征向量 Eigenvectors	第 1 主成分 Principal component 1	第 2 主成分 Principal component 2	第 3 主成分 Principal component 3
根长 Root length	0.11	0.39	0.72
根鲜质量 Root fresh mass	0.56	-0.13	-0.41
投影面积 Projection area	0.83	-0.43	0.05
像素面积 Pixel area	0.72	-0.38	0.01
表面积 Surface area	0.84	-0.38	0.04
体积 Volume	0.60	-0.35	0.53
连接数 Number of connection	0.78	0.45	-0.23
节点数 Number of node	0.71	0.51	0.05
根尖数 Root tips number	0.35	0.66	0.14
分叉数 Number of forks	0.56	0.44	-0.28
特征根 Eigenvalues	4.13	1.84	1.13
贡献率 Contribution rate/%	41.29	18.44	11.30
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	41.29	59.72	71.03

2.5 根据隶属函数值法评价海岛棉幼苗期耐碱性

利用公式(2)计算各特征性状耐碱系数的隶属函数值($U(X_i)$),以其均值(μ)进行评价(表 5)。 μ 值大小代表耐碱性强弱,排序结果为耐碱性最强的 3 个品种为 BM-1、8813Y 和 JZ-1;耐碱最弱的品种为 4401、S(L)和 PI。

2.6 根据 D 值评价海岛棉幼苗期耐碱性

利用 3 个主成分和公式(2)分别计算(X_i),利用贡献率结合公式(3)计算权重分别为 58.13%、

25.96%和 15.91%,根据公式(2)~(4)计算出 D 值(表 5)。排序可知,耐碱最强的 3 个品种为 80402、8813Y 和 JZ-1;耐碱性最弱的 3 个品种为 4401、S(L)和 PI。

2.7 综合评价海岛棉幼苗期耐碱性

隶属函数法与 D 值评价属于不同的评价方法,结果是否合理需多方参考。通过图 1 可知隶属函数法与 D 值之间拟合性较好,呈极显著相关(图 1),因此两者可以统一进行评价。将两者评价价值标准化求得均值(综合评价值)评价海岛棉耐碱性(表 5)。综合评价值进行系统聚类,分为 4 个类群,第 I 类群敏感材料有 2 份,占比 6.67%,分别为 4401 和 S(L);第 II 类群有弱耐碱材料 11 份,占比 36.67%,为 PI、90199、K388 和 SK202 等;第 III 类群有耐碱材料 16 份,占比 53.33%,为 BZ-3761、73-14、80402 和 8813Y 等;第 IV 类群强抗材料有 1 份,占比 3.33%,为 JZ-1。表明所选材料主要以中间型为主,极端材料较少。

3 讨论

根系是作物吸收土壤水分与营养物质的媒介,是作物得以正常生长的基础。本研究以不同 Na_2CO_3 胁迫浓度处理海岛棉,基于不同基因型海岛棉根部特征性状评价海岛棉幼苗期耐碱性,发现海岛棉耐 Na_2CO_3 的最适比重为 0.09%。描述性统计发现,在 Na_2CO_3 胁迫下海岛棉幼苗期根部生长指标均有所降

表 5 不同方法评价海岛棉耐碱性

Table 5 Evaluation of alkali resistance of Sea-island cotton by different methods

品种 Cultivar	<i>D</i>	μ	综合评价价值 Comprehensive evaluation value	品种 Cultivar	<i>D</i>	μ	综合评价价值 Comprehensive evaluation value
PI	0.35	0.29	-1.46	XH-2	0.48	0.42	-0.69
BM-1	0.72	0.72	0.94	A101	0.60	0.57	0.14
270	0.53	0.49	-0.33	73-14	0.76	0.68	0.95
SK202	0.45	0.41	-0.81	H92-1	0.73	0.72	0.97
DJ-07-136	0.47	0.43	-0.70	BZ-3761	0.75	0.66	0.85
K388	0.41	0.38	-1.01	2525	0.62	0.61	0.30
C-6022	0.51	0.36	-0.76	A106	0.67	0.62	0.48
ZC-1	0.71	0.69	0.81	JZ30	0.54	0.44	-0.44
S(L)	0.28	0.20	-1.93	5931	0.65	0.59	0.36
T82-6-17	0.73	0.67	0.81	4401	0.23	0.09	-2.43
1430	0.67	0.53	0.21	JZ-1	0.94	0.81	1.87
7045	0.73	0.69	0.89	90199	0.36	0.39	-1.16
BZ-3021	0.57	0.50	-0.16	A102	0.70	0.61	0.53
80402	0.76	0.61	0.74	8813Y	0.80	0.72	1.18
5904Y	0.63	0.53	0.10	JZ57	0.57	0.49	-0.22

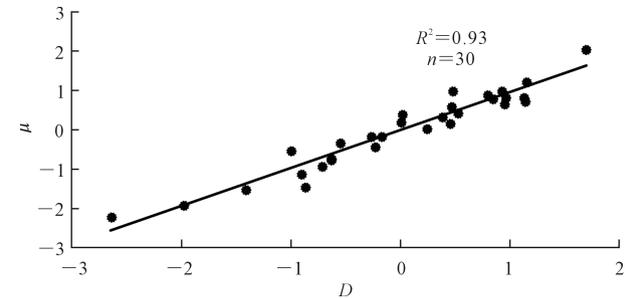


图 1 *D* 值与 μ 值线性关系

Fig.1 Linear relationship between *D* value and μ value

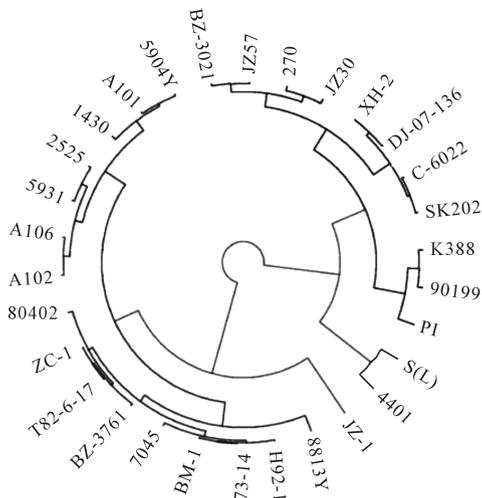


图 2 综合评价价值聚类分析

Fig.2 Clustering analysis of comprehensive evaluation value

低,根尖数和分叉数受抑制较小,根鲜质量、像素面积和表面积受抑制较明显,这与陈振^[30]和严青青^[9]等在高浓度复合碱性盐下的研究结果一致,说明复合碱和单碱对于海岛棉胁迫影响相近,主要是由于 pH 值的升高抑制海岛棉侧根生长及侧根数目^[12]。

在 0.09% 的 Na_2CO_3 胁迫下群体各特征性状变异均大于 8.00%,表明在 0.09% Na_2CO_3 胁迫浓度下海岛棉群体变异类型较丰富;分叉数、连接数和节点数变异较大,表明群体在 Na_2CO_3 胁迫下分叉数、连接数和节点数变异类型较丰富,在此浓度下适合做评价分析;像素面积变异较小,表明群体在 Na_2CO_3 胁迫下像素面积变异较小。

对两种评价方式进行正态拟合发现隶属函数值和 *D* 值之间拟合性较好,极显著相关,因此两者可统一进行评价。基于综合评价发现敏感类型、弱耐碱类型、耐碱类型和强抗类型占比分别为 6.67%、36.67%、53.33% 和 3.33%,主要以中间型为主,极端材料相对较少,与王俊铨等^[31]研究结果一致,与部分学者研究结果不尽相同^[23,32],需进一步探究。本研究最终筛选到敏感材料 2 份,强抗材料 1 份。

4 结 论

根作为最直接且最早接触到逆境的部位,根的生长发育状况和活力对植物的抗逆能力至关重要。本研究基于根特征筛选到 0.09% 为 Na_2CO_3 胁迫的最适浓度,基于两种方法综合评价海岛棉耐碱性,并筛选到敏感材料 4401 和 S(L),强抗材料 JZ-1,为海岛棉耐碱育种及研究耐碱机理提供了一定的参考依据。

参 考 文 献:

- [1] HASSANI A, AZAPAGIC A, SHOKRI N. Global predictions of primary soil salinization under changing climate in the 21st century[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6663.
- [2] GOHARI G, MOHAMMADI A, AKBARI A, et al. Titanium dioxide nanoparticles (TiO_2 NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 912.
- [3] DILNUR T, PENG Z, PAN Z E, et al. Association analysis of salt tolerance in Asiatic cotton (*Gossypium arboreum*) with SNP markers[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(9): 2168.
- [4] AL-KARAKI G N. Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water [J]. Scientia Horticulturae, 2006, 109(1): 1-7.
- [5] CHEN X J, HUANG Q S, ZHANG F, et al. *ZmCIPK21*, a maize CBL-interacting kinase, enhances salt stress tolerance in *Arabidopsis thaliana* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2014, 15(8): 14819-14834.
- [6] DAS P, LAKRA N, NUTAN K K, et al. A unique bZIP transcription factor imparting multiple stress tolerance in rice[J]. Rice, 2019, 12(1): 58.
- [7] ZOU P, LU X L, JING C L, et al. Low-molecular-weight polysaccharides from *Pyropia yezoensis* enhance tolerance of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) to salt stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 427.

- [8] SU X J, ZHU G Z, SONG X H, et al. Genome-wide association analysis reveals loci and candidate genes involved in fiber quality traits in sea island cotton (*Gossypium barbadense*) [J]. BMC Plant Biology, 2020, 20 (1): 289.
- [9] 严青青, 张巨松, 徐海江, 等. 盐碱胁迫对海岛棉幼苗生物量分配和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7632-7640.
YAN Q Q, ZHANG J S, XU H J, et al. Effects of saline-alkali stress on biomass allocation and root morphology of Sea Island cotton seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7632-7640.
- [10] 杨涛, 李生梅, 黄雅婕, 等. 海岛棉资源自然复合盐胁迫综合评价[J]. 核农学报, 2021, 35(7): 1507-1521.
YANG T, LI S M, HUANG Y J, et al. Comprehensive evaluation of natural compound salt stress of sea-island cotton resources[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(7): 1507-1521.
- [11] LI N, LIU H L, SUN J, et al. Transcriptome analysis of two contrasting rice cultivars during alkaline stress [J]. Scientific Reports, 2018, 8 (1): 9586.
- [12] CHEN W C, CUI P J, SUN H Y, et al. Comparative effects of salt and alkali stresses on organic acid accumulation and Ionic balance of seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Industrial Crops and Products, 2009, 30(3): 351-358.
- [13] LOU Q J, CHEN L, MEI H W, et al. Quantitative trait locus mapping of deep rooting by linkage and association analysis in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2015, 66(15): 4749-4757.
- [14] BHASKARLA V, ZINTA G, FORD R, et al. Comparative root transcriptomics provide insights into drought adaptation strategies in chickpea (*Cicer arietinum* L.) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(5): 1781.
- [15] HE J N, SHI Y, ZHAO J Y, et al. Strip rotary tillage with a two-year subsoiling interval enhances root growth and yield in wheat [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 11678.
- [16] HE H Y, OO T L, HUANG W J, et al. Nitric oxide acts as an antioxidant and inhibits programmed cell death induced by aluminum in the root tips of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 9516.
- [17] ZAREBANADKOUKI M, MEUNIER F, COUVREUR V, et al. Estimation of the hydraulic conductivities of lupineroots by inverse modelling of high-resolution measurements of root water uptake [J]. Annals of Botany, 2016, 118(4): 853-864.
- [18] ZAREBANADKOUKI M, TRTIK P, HAYAT F, et al. Root water uptake and its pathways across the root: quantification at the cellular scale [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12979.
- [19] YANG Z, LI J L, LIU L N, et al. Photosynthetic regulation under salt stress and salt-tolerance mechanism of sweet sorghum [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 10: 1722.
- [20] GUO H J, HUANG Z J, LI M Q, et al. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21844.
- [21] CUI J Q, HUA Y P, ZHOU T, et al. Global landscapes of the Na⁺/H⁺ antiporter (NHX) family members uncover their potential roles in regulating the rapeseed resistance to salt stress [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(10): 3429.
- [22] 王庆惠, 杨嘉鹏, 向光荣, 等. 盐胁迫对不同基因型棉花苗期光合特性和养分吸收的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 9-15.
WANG Q H, YANG J P, XIANG G R, et al. Effects of salt stress on root morphology and physiological characteristics of potted cotton at seedling stage [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(5): 9-15.
- [23] ZHANG, H H, LI X, XU N, et al. Alkalinity and salinity tolerance during seed germination and early seedling stages of three alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars [J]. Legume Research, 2017, 40(5): 853-858.
- [24] QIU T, JIANG L L, LI S Z, et al. Small-scale habitat-specific variation and adaptive divergence of photosynthetic pigments in different alkali soils in reed identified by common garden and genetic tests [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 2016.
- [25] 赵海燕, 王建设, 刘林强, 等. 海岛棉苗期盐胁迫下形态学和生理学指标变化[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3494-3505.
ZHAO H Y, WANG J S, LIU L Q, et al. Morphological and physiological mechanism of salt tolerance in *Gossypium barbadense* to salt stress at seedling stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (18): 3494-3505.
- [26] 杨淑萍, 危常州, 梁永超. 盐胁迫对不同基因型海岛棉光合作用及荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1585-1593.
YANG S P, WEI C Z, LIANG Y C. Effects of NaCl stress on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence at seedlings stage in different sea island cotton genotypes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(8): 1585-1593.
- [27] YUAN Y C, XING H X, ZENG W G, et al. Genome-wide association and differential expression analysis of salt tolerance in *Gossypium hirsutum* L. at the germination stage [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19 (1): 394.
- [28] SU Y C, WANG Z Q, XU L P, et al. Early selection for smut resistance in sugarcane using pathogen proliferation and changes in physiological and biochemical indices [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1133.
- [29] CAO X, JIANG F L, WANG X, et al. Comprehensive evaluation and screening for chilling-tolerance in tomato lines at the seedling stage [J]. Euphytica, 2015, 205(2): 569-584.
- [30] 张国伟, 路海玲, 张雷, 等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2045-2053.
ZHANG G W, LU H L, ZHANG L, et al. Salt tolerance evaluation of cotton (*Gossypium hirsutum*) at its germinating and seedling stages and selection of related indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2045-2053.
- [31] ZHENG J Y, ZHANG Z L, GONG Z L, et al. Genome-wide association analysis of salt-tolerant traits in terrestrial cotton at seedling stage [J]. Plants, 2021, 11(1): 97.
- [32] 陈振, 张巨松, 严青青, 等. 不同基因型海岛棉根系形态参数对复合盐碱胁迫的响应[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(11): 1961-1970.
CHEN Z, ZHANG J S, YAN Q Q, et al. Responses of root morphological parameters to complex saline-alkali stress among island cotton varieties with different genotypes [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(11): 1961-1970.
- [33] 王俊铎, 曾辉, 龚照龙, 等. 陆地棉品种资源耐复合盐碱性综合评价分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(10): 1-11.
WANG J D, ZENG H, GONG Z L, et al. Comprehensive assessment of complex salt-alkali tolerance of the upland cotton varieties resources [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(10): 1-11.
- [34] 徐佳陵. 陆地棉种质耐盐性评价及其与 SNP 关联分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
XU J L. Evaluation of salt tolerance of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and its correlation with SNP [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.